

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДИНАМІКИ ЛІКВІДАЦІЇ ПРИХОПЛЕНЬ КОЛОНИ УДАРНИМИ ПРИСТРОЯМИ

¹ Б.М.Малярчук, ² П.І.Огородніков, ¹ В.М.Світлицький

¹ ДК "Укргазвидобування", м. Київ e-mail: svetlitsky@gasdob.com.ua

² МНТУ, м. Київ, e-mail: ogorodnikov@mail.ru

Рассмотрены теоретические основы динамики ликвидации прихватов колонны ударными устройствами. Обосновано решающее значение выбора компоновки над и под УПП (устройством ликвидации прихватов), а также типа самого устройства (вибрационный, ударный) в зависимости от глубины и формы (искривления) скважины; возможной причины аварии; геологических условий зоны прихвата, характеристик породы и т.д.

Боротьбу за зменшення аварійності можна проводити шляхом впровадження заходів з попередження аварій, або шляхом вдосконалення ловильного інструменту і методів ліквідації аварій. На основі досвіду бурових робіт у різних регіонах України і СНД було рекомендовано чимало заходів з попередження аварійності [1], однак аварійність, пов'язана з прихопленнями бурового інструменту, досі залишається дуже високою як у разі буріння нафтогазових свердловин, так і у разі геологічного буріння. Такий стан справ в бурінні змушує до вдосконалення технологій і інструментів для ліквідації прихоплень на базі вивчення динамічних процесів в бурильній колоні. Особливо це стосується ліквідації прихоплень у свердловинах з викривленим стовбуром. Успішний хід ліквідації прихоплень пов'язаний, головним чином, з правильним вибором технічних засобів, режиму їх роботи і компонувань над ПЛП (пристрій ліквідації прихоплень) і під ним, над головою прихоплення. Основним чинником, від якого

залежить вибір способу ліквідації прихоплень, параметри роботи ПЛП і його типу, є геологічні умови проводки свердловини і тип прихоплення.

Невірний вибір методики і механізмів призводить до ускладнення аварій. Науковий підхід до процесу ліквідації аварій і виконання необхідних техніко-організаційних заходів – запорука успіху під час ліквідації прихоплень та інших видів аварій.

Вибір компонувань над ПЛП і під ним і типу самого пристрою (вібраційний, ударний) буде залежати, в основному, від таких показників: глибина і форма (викривлення) свердловини; можлива причина аварії; геологічні умови зони прихоплення; стійкість та інші властивості порід, які складають стінки свердловини, а також інші обставини, які характеризують прихоплення: можлива кількість тлиму в свердловині, висота, на яку було піднято інструмент над

Theoretical bases of dynamics of column freeze liquidation by impact devices are studied. The authors accentuate on significant value of arrangement of the device for freeze liquidation: type of device (vibration, impact) depending on a depth and forms (curvatures) of well; possible reasons of failure; geological terms of area of freeze, descriptions of rock and etc.

вибоєм під час прихоплення, наявність циркуляції тощо.

На теперішній час значною мірою вивчені явища, які виникають під час ліквідації прихоплень вібраційними методами. Процеси, які відбуваються в зоні прихоплень, з врахуванням яких хвильової енергії, ударними і ударно-вібраційними пристроями дослідженні недостатньо. Ефект взаємодії віброуючої поверхні прихопленої труби з породою, зумовлений ударним імпульсом, залежить від конкретних геологічних умов і фізико-механічних властивостей складу порід, які зумовили прихоплення.

Труби, які прихоплені сипучим матеріалом і знаходяться під дією ударно-вібраційного навантаження, призводять до зменшення сил взаємодії між окремими зернами породи. Це призводить до більшої рухомості частинок і маса породи навколо прихопленої труби стає схожою на в'язке середовище. Фізико-механічні властивості цього середовища характеризується коефіцієнтом вібров'язкості [2].

Якщо зона прихоплення представлена породами, які мають тискотропні властивості (прилипання труб до глинистія кірки, затискання в скупчених породах глинистого комплексу тощо), то дія вібраційного поля відрізняється. В зоні між стінками труби і породою під дією вібраційного (хвильового) поля, яке передає енергію в породу, відбувається руйнування структури і виділення вільної води гідратними оболонками. Навколо води виникає розріджений шар [2], який дає можливість збільшення прихопленої частини колони під дією попереднього статистичного навантаження. Відбувається зміна сухого тертя на гідродинамічне, що понижує опір переміщенню прихопленої колони.

У випадку, коли інструмент прихоплений за рахунок розклинювання труб великими шматками породи, коефіцієнт сухого тертя і сили зчеплення під дією післяударної вібрації інструменту між ними зменшуються, що полегшує вивільнення інструменту під дією попереднього натягу.

Таким чином, теоретично можна розглядати два випадки – дія на прихоплену зону колони сил в'язкого опору або дію тангенціальних сил сухого тертя.

Таким чином, прихоплена частина колони за умови надання їй деякої рухомості знаходиться в складному русі: на рух під дією натягнутої колони (переносний рух) накладається хвильовий рух, спричинений ударом ПЛП, що викликає зміну характеру взаємодії поверхні прихопленої труби з зовнішнім середовищем і поведінкою цього середовища.

Залежно від значення параметрів у системі прихопленої бурильної колони можна розглядати три типи переносного руху: регулярний – рух з постійною швидкістю (наприклад, під час встановлення нафтової ванни); прискорений – рух під дією вібрацій або хвильових процесів; і чисто коливний – коли рухомість прихопленої частини не реагує на прикладені статичні і динамічні навантаження.

Для визначення силових умов ліквідації прихоплення умовно поділимо систему на дві частини: нижню – до ПЛП і верхню – під ПЛП та врахуємо, що на нижню (прихоплену) частину діє рівнодійна сила

$$F(t) = Mg + P_0 + F(t), \quad (1)$$

де: M – маса прихопленої частини і компоновки між ПЛП і головою прихоплення; P_0 – статистичний натяг; $F(t)$ – ударна сила (синусоїдальний імпульс).

Тоді рівнодійна сила, прикладена до прихопленої частини (без врахування реакції)? в післяударний період до затухання коливних процесів буде

$$F(t) = Mg + P_0 + \sigma(t), \quad (2)$$

де $\sigma(t)$ – змінні сили, викликані хвильовим процесом в перетинах труб.

Розглянемо можливе переміщення прихоплених труб під дією тільки сили P_0 . При цьому будемо виходити з лінійності залежності між контактними (дотичними) напруженнями τ і осьовими переміщеннями u в поперечних перетинах прихопленої частини колони (рис. 1)

$$\tau = -ku, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт дотичного опору породи прихоплення.

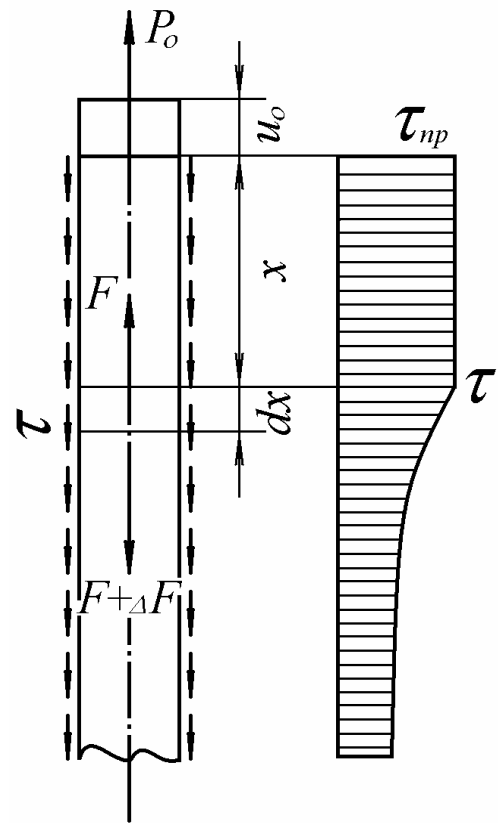


Рисунок 1

З умови рівноваги елемента dx довжини колони (прихопленої частини) і сумісності їх переміщення з породою, яка викликала прихоплення, отримаємо такий розв'язок:

$$\frac{du}{dx} = \frac{F}{E_n S}; \quad \tau \pi D = -\frac{dF}{dx}, \quad (4)$$

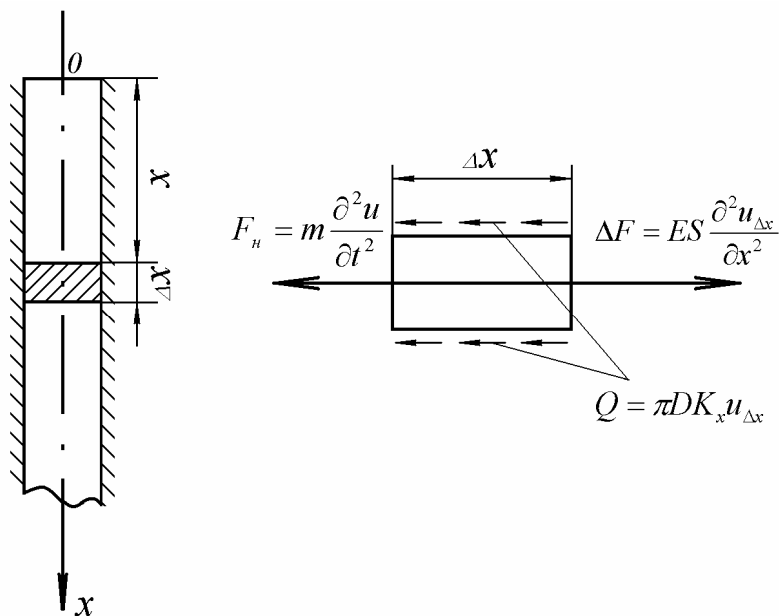


Рисунок 2

де: E_n – модуль пружності в перетині; S – площа перетину; D – діаметр труби.

З врахуванням (3) за $n = \sqrt{\frac{k}{Dh}}$ отримаємо диференціальне рівняння

$$\frac{d^2 F}{dx^2} = n^2 F. \quad (5)$$

Розв'язання цього рівняння допоможе знайти осові зусилля

$$F = C_1 e^{nx} + C_2 e^{-nx}. \quad (6)$$

Розглянемо випадок, коли прихоплення по довжині значне (защемлення). У цьому випадку можемо вважати, що нижня частина прихоплення не дає зриву (по всій довжині). Тоді, приймаючи трубу як напівнескінченну ($t = 0$, $C_1 = 0$), за $x = 0$, $F_0 = P$

$$F = P \cdot e^{-nx}; \tau = \frac{nP}{\pi D} e^{-n}; u = \frac{P}{nE_n \cdot S} e^{-nx}. \quad (7)$$

Якщо $F > P_{np} = \frac{T_0}{n}$, де $T_0 = \pi D \tau_{np}$, то на ділянці l_0 , яка дотикається до вільного кінця прихопленої частини труб, відбувається зрив

$$l_0 = \frac{P}{T_0} - \frac{1}{n}; \quad u_0 = -\frac{1}{2E_n F} \left(\frac{P^2}{T_0} + \frac{T_0}{n^2} \right). \quad (8)$$

Таким чином, під дією статичного (попереднього) натягу за визначених умов можливий зрив. У разі застосування ПЛП необхідно розрахувати вузол роз'єднання на остаточне навантаження, яке б забезпечувало зрив, що полегшує подальшу ліквідацію прихоплення.

Розглянемо поведінку прихопленої частини бурильної колоні під впливом хвильового процесу, який виникає під дією ударного імпульсу.

Для цього вісь x спрямуємо вздовж осі труб і виділимо елемент труби dx на відстані x від початку координат (рис. 2). Позначимо переміщення цього елемента відносно зони прихоплення (відносно породи) через $u(x, t)$. Надалі таке переміщення будемо називати відносним. Припустимо, що взаємодія породи, що оточує трубу, лінійно залежить від переміщення труби під дією ударного імпульсу і післяударних коливань відносно породи, яка обумовила прихоплення

$$\tau = k_x u(x, t), \quad (9)$$

де: τ – дотична поздовжня напруга на стінках труби; k_x – коефіцієнт пропорційності, що стосується перетину труби, який розглядається.

При такому припущенні рівнодійні сили взаємодії дорівнюватимуть

$$Q = \pm \pi D_3 k_x u(x, t) dx, \quad (10)$$

де D_3 – зовнішній діаметр труб.

Поздовжня сила, яка виникає в трубі, дорівнюватиме $\Delta = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx$, де E – модуль Юнга;

S – площа перерізу труби. Сила інерції для даного елемента труби записується як $F_{in} = -m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx$.

Спроектуювавши сили на вісь x і виконавши елементарні перетворення, отримаємо диференціальні рівняння коливань прихопленої частини труб бурильної колоні

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \pm b^2 u = 0, \quad (11)$$

де $b_u^2 = \frac{\pi D k_x}{m}$; $m = \rho F$ – маса одиниці довжини труб.

Знак мінус за b_u^2 зберігається в тому випадку, коли рух елемента труби спрямований від положення рівноваги, при зворотному русі береться – мінус. Для визначення максимальних значень вібронапружень і переміщень в трубах обмежимо розглядом третьої чверті періоду, а коефіцієнт b^2 візьмемо зі знаком мінус.

Рівняння (11) не враховує розсіювання енергії в матеріалі труб.

Для кінцевого отримання рівняння коливань прихопленої частини труб представимо τ в більш загальній формі $\tau = \phi(u)$.

Тоді дотична рівнодійних сил взаємодії між стінками труби і породою запишеться

$$Q = \phi(u)dx, \quad (12)$$

де $\phi(u)$ – деяка функція, яка залежить від переміщення і фізико-механічних властивостей прихоплення – прилеглої зони контакту між трубою і породою.

В цьому випадку, більш узагальнене рівняння буде виглядати так:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{E}{m(x)} - \frac{\partial}{\partial x} \left[x \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{m(x)} \phi(u) = 0. \quad (13)$$

Рівняння (13) являє собою загальне рівняння коливань прихопленої частини бурової колон. Воно враховує зміну перетинів труб прихопленої частини компонування, істинний опір породи, а також розсіювання енергії в матеріалі труб.

Рівняння (13) можна спростити, якщо прийняти гіпотезу Фохта для врахування розсіювання енергії в матеріалі труб, сили взаємодії труби і породи пропорційними першому ступеню зміщення, а площу поперечного перетину прийняти постійною по довжині прихопленої ділянки труби, тоді (13) запишеться

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - a_\tau^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2n \frac{\partial u}{\partial t} \pm b^2 u = 0, \quad (14)$$

$$\text{де } a_\tau^2 = \frac{ES}{m}.$$

Таким чином, ми отримали відоме телеграфне рівняння. Тоді дослідження умов ліквідації прихоплення ударним способом для прихопленої частини колони зводиться до розв'язання лінійного диференціального рівняння в часткових похідних за відповідних початкових умов із врахуванням процесів, які виникають в граничних зонах між стінками труби і породою.

Для розв'язання рівняння (11) використаємо метод Фур'є [3]. При цьому розкладемо функцію $u(x, t)$ за власними функціями

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(t) v_n(x), \text{ де } v_n(x) - \text{власні функції}$$

повдовжніх коливань прихопленої частини колони нижче ударного пристрою, які визначають задовільнення закріплення на кінцях.

Отримане телеграфне рівняння дає можливість використати імпедансний метод, для подальших досліджень який застосовується в тео-

рії довгих електричних ліній [4]. При цьому використаємо електромеханічну аналогію [5]. Необхідно відмітити, що при розповсюдженні струму по кабелю виникає магнітне поле, яке аналогічно протидії породи руху труб в прихопленій зоні, в деякій мірі протидії розповсюдженню струму по кабелю. Таким чином теорія прихопленої частини бурової колони, в після ударний період, як довгого стрижня, ідентична теорії електричної лінії. Рівняння електричної лінії відповідно до рівняння (11) після елементарних перетворень запишеться

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial u}{\partial t} + r_2 u, \quad (15)$$

$$\text{де } r_1 = RC - GL; r_2 = RG; C^2 = \frac{1}{LG}.$$

В електричній лінії протяжністю від $x = 0$ до $x = l$ будуть наступні постійні, віднесені до одиниці довжини: R – опір, L – індуктивність, C – ємність, G – провідність витікання НМ, всі величини стосуються одиниці довжини.

Для прихоплення труб, як стрижня, диференціальне рівняння запишеться

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + r_1 \frac{\partial u}{\partial t} + r_2 u, \quad (16)$$

$$\text{де } r_1 = RK + GM; r_2 = RG; C^2 = \frac{1}{MK};$$

M – маса; K – піддатливість; R – опір втрат, G – провідність демпфування.

При складанні рівняння відрізка прихопленої колони виходячи з електромеханічної аналогії можна записати

$$u_2 - u_1 = \frac{\partial u}{\partial x} \delta x = -M \delta x \frac{\partial u}{\partial t} - R \delta x \cdot v. \quad (17)$$

При обчисленні стиснутого елемента стрижня можна нехтувати змінною сили із-за інерціальної реакції, і тоді

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -k \frac{\partial u}{\partial t} - Gu, \quad (18)$$

де G – провідність демпфування.

У випадку періодичних зміни $\partial / \partial t = j\omega$ і рівняння (17) та (18) приймають вигляд

$$-\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} = (R + j\omega M)v; \quad (19)$$

$$-\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} = \left(G + j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \right). \quad (20)$$

Отже,

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} = (R + j\omega M) \left(G + j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \right) \tilde{u} = \quad (21)$$

$$j\omega M \cdot j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \left(1 - j \frac{R}{\omega M} \right) \left(1 - j \frac{G}{\omega \frac{1}{(MK)^{-2}}} \right) \tilde{u}$$

або

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} = -k^2 \tilde{u}, \quad (22)$$

де

$$-k^2 = (R - j\omega M) \left(G + j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \right) \quad (23)$$

і

$$\begin{aligned} k &= \sqrt{-(R - j\omega M) \left(G + j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \right)} = \\ &= \sqrt{\omega^2 M \frac{1}{MK} \left(1 - j \frac{1}{MK} \right) \left(1 - j \frac{G}{\omega \frac{1}{MK}} \right)} = \quad (24) \\ &= \sqrt{\omega^2 L \frac{1}{MK} \left(1 - \frac{j\eta}{2} \right)} = k_0 \left(1 - \frac{j\eta}{2} \right), \end{aligned}$$

$$\text{де } k_0 = \frac{\omega}{\frac{1}{MK}}; \quad k = ES \quad \text{і} \quad \eta = \frac{R}{\omega L} + \frac{G}{\omega \frac{1}{MK}} -$$

квадрат малих величин.

При вилученні квадратного кореня необхідно брати знак плюс, оскільки тільки в цьому випадку, ми отримаємо хвилі амплітуди, яких зменшуються з віддалю. Загальним рівнянням хвильових рівнянь (15), (16) буде [5]

$$\tilde{\sigma} = \tilde{A} \cos \tilde{k}x + \tilde{B} \sin \tilde{k}x = \tilde{\sigma}_S \cos \tilde{k}x + \tilde{B} \sin \tilde{k}x; \quad (25)$$

$$\tilde{v} = \tilde{C} \cos \tilde{k}x + \tilde{D} \sin \tilde{k}x = \tilde{v}_S \cos \tilde{k}x + \tilde{D} \sin \tilde{k}x, \quad (26)$$

де $\tilde{\sigma}_S$ і \tilde{v}_S – сила і швидкість на голові прихоплення при $x = 0$.

$$\begin{aligned} \text{З рівняння (19) отримаємо співвідношення} \\ -\tilde{u} \tilde{k} \sin \tilde{k}x + \tilde{B} \tilde{k} \cos \tilde{k}x = \quad (27) \\ = (R + j\omega M) (\tilde{v}_S \cos \tilde{k}x + \tilde{D} \sin \tilde{k}x). \end{aligned}$$

Оскільки це співвідношення має виконуватись за всіх значень x , коефіцієнти при синусах і косинусах в правій і лівій частині мають співпадати:

$$\tilde{\sigma}_S = \tilde{D} \frac{R + j\omega M}{\tilde{k}} = j\tilde{Z} \tilde{D}; \quad (28)$$

$$\tilde{B} = -\tilde{v}_S \frac{R + j\omega M}{\tilde{k}} = j\tilde{v}_S \tilde{Z}, \quad (29)$$

де характеристичний імпеданс стрижня (прихопленої частини колони)

$$\tilde{Z}_C = j \frac{R + j\omega M}{\tilde{k}} = \sqrt{\frac{R + j\omega M}{G + j\omega \frac{1}{MK}}}. \quad (30)$$

У разі набуття колоною рухомості, зовнішнє “тертя” між стінками прихоплених труб і породою незначні, то характеристичний імпеданс прихоплених труб, які звільняються, має вигляд

$$\bar{Z}_C = \sqrt{M\sigma\lambda_E} \left[1 + j \frac{\eta_k}{2} \right] = M_C. \quad (31)$$

Тоді рішення може бути записане в такому вигляді:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_S \cos \bar{k}x + j\tilde{v} \bar{Z}_C \sin \bar{k}x \quad (32)$$

та

$$\tilde{v} = \tilde{v}_S \cos \tilde{k}x + \frac{\tilde{u}_0}{j\bar{Z}_C} \sin \bar{k}x. \quad (33)$$

Найбільш важлива величина – вхідний імпеданс Z_S стрижня (труб), замкнутих на імпеданс навантаження \bar{Z}_l (наприклад, прихоплення долота, амортизатор над долотом чи вибійного двигуна, який знаходиться нижче зони прихоплення):

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{\sigma}_l}{\tilde{v}} = \bar{Z}_l &= \frac{\bar{v}_S \cos \bar{k}l - j\tilde{v}_S \sin \bar{k}l}{\bar{v}_S \cos \bar{k}l + (j\tilde{v}_S / \bar{Z}_C) \sin \bar{k}l} = \\ &= \frac{(\tilde{\sigma}_S / \tilde{v}_S) - j\bar{Z}_C \operatorname{tg} \bar{k}l}{1 + (\tilde{v}_S / j\tilde{v}_S)(1 / \bar{Z}_C) \operatorname{tg} \bar{k}l} = \quad (34) \\ &= \frac{\bar{Z}_C - j\bar{Z}_C \operatorname{tg} \bar{k}l}{1 - j(\bar{Z} / \bar{Z}_C) \operatorname{tg} \bar{k}l}. \end{aligned}$$

Це дає можливість використовувати імпедансний метод для розв’язання задач динаміки ліквідації прихоплень ударними пристроями.

Література

- 1 Ветров А.К., Коломеец А.В. Аварии в разведочном бурении и способы борьбы с ними. – М.: Недра, 1969. – 178 с.
- 2 Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. – М.: Машиностроение, 1969. – 257 с.
- 3 Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. – М.: Изд. физ.-матем. Лит., 1960. – 207 с.
- 4 Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. – М.: Связь, 1973. – 272 с.
- 5 Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. – М.: Мир, 1971. – 557 с.